

斜面侵食による濁度物質の生産・流出機構に関する研究 On The Yield Of Wash Load By Slope Erosion

京都大学防災研究所 正 芦田 和男
京都大学防災研究所 正 ○江 頭 進 治
建設省計画局 正 金屋敷忠儀

1. 緒言

貯水池の堆砂や濁水現象において重要な微細土砂は、裸地斜面や流域河道に存在し、雨水流や河道流の侵食現象を通して生産・流送されるものと思われるが、その機構については未解明の所が少なくなく、定量的な予測法を確立するためには、その機構の究明が必要である。

裸地斜面の侵食現象に関しては、一般に斜面材料の粘着性が問題になる。こういった粘着性流路床の侵食機構を扱った代表的なものに Partheniades¹⁾ および 芦田・田中²⁾らの研究があるが、裸地斜面の侵食による wash load の流出機構を議論する場合、芦田らが提案した侵食速度の概念を用いると、問題をかなり単純化することが可能である。

本研究においては、雨水流による斜面侵食の形態のうち、土砂の生産・流出に対してとくに支配的と思われるガリ侵食を取り上げて、上の考え方にに基づき wash load の流出機構を考察するとともに、崩壊裸地斜面における抵抗則、侵食速度やガリ下流端の流出濁度に関する現地実験結果について述べる。

2. ガリ侵食に伴う濁度物質の生産・流出機構

(1) 粗い粒子の移動限界に関する考察

簡単のため、単一粒径の粗粒子と粘着力をもつ微細粒子の混合物によって斜面が構成されているものとし、さらに、粗粒子のかみ合いは一般の非粘着性材料の砂礫床と同様であって、微細成分は、単に空隙を埋めている状態を想定する。こういった状況において、二次元流れにおける砂礫に働く力を模式的に示すと図-1 のようである。同図で、 θ : 斜面こう配、 d : 粒子径、 F_W : 重力、 F_B : 浮力、 F_D : 抗力、 F_L : 揚力、 F_C : 粘着力である。ここで、斜面のせん断破壊は起らないものとし、粘着力 F_C は、微細成分の占める割合 p_f および h_a/d の関数である面積係数 $k'_1(p_f, h_a/d)$ および単位面積当りの粘着力 f_c を用いて、

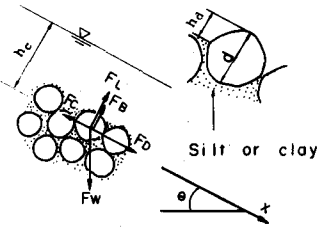


図-1 粗い粒子に働く力

$$F_C = k'_1(p_f, h_a/d) d^2 f_c \dots\dots\dots (1)$$

のように表示されるものとすれば、粒子の移動限界に関する無次元限界掃流力 τ_{*cc} は、非粘着性材料の移動限界に関する 芦田・大同・高橋・水山³⁾の研究を参考にして次のように求められる。

$$\begin{aligned} \tau_{*cc} &\equiv \frac{u_*^2 c_c}{(S-1)gd} = \frac{2k_3}{C_D(k_2 + k_1 C_L/C_D \cdot \tan \phi)} \frac{1}{\alpha^2} (\cos \theta \tan \phi - \frac{S}{S-1} \sin \theta) \\ &+ \frac{2k'_1}{C_D(k_2 + k_1 C_L/C_D \cdot \tan \phi)} \frac{1}{\alpha^2} \frac{f_c}{(\rho_s - \rho)gd} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここに、 C_D 、 C_L : それぞれ抗力および揚力係数 ; k_1 、 k_2 : 面積係数 ; k_3 : 体積係数であって、粒子が球の場合、 $k_1 = k_2 = \pi/4$ 、 $k_3 = \pi/6$ である。 ρ_s 、 ρ : それぞれ粒子および流体密度 ; $S = \rho_s/\rho$ 、 ϕ : 水中安息角 ; $\alpha = u_d/u_*$ (u_d : 粒子に作用する流速) である。いま、Shields の無次元限界掃流力を τ_{*c} とすると、(1)式は次のように変形される。

$$\tau_{*c} = (\cos \theta \tan \varphi - \frac{S}{S-1} \sin \theta) \tau_{*c} + \frac{k'_1 (p_r h_d/d)}{k_s} \tau_{*c} f_{c*} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 f_{c*} ：無次元粘着力 $f_{c*} = f_c / (\rho_s - \rho)gd$ である。 $\tan \varphi = 1.0$ とすると、 $\theta = 32^\circ$ のとき、右辺第1項の係数は0となる。急こう配斜面上で、水流の作用を受けても粗粒子が容易に移動しないのは、右辺第2項の粘着力による抵抗によるものであり、斜面における土砂の生産・流出機構に対する粘着力の重要性が伺える。

粘着力による抵抗は、面積係数 $k'_1 (p_r h_d/d)$ によって大きく変化することが推察される。いま、(3)式の右辺、すなわち、流水に対する抵抗力を τ_{*r} 、流水の無次元掃流力を τ_* とし、微細粒子層の侵食に伴って τ_{*r} がどのように変化するか、模式的に説明しよう。図-2は、粗粒子の移動周期 T 、微細粒子層の侵食が進み粗粒子が移動可能な状態になるまでの時間 T' およびこの状態から移動するまでの時間 $\bar{T}$ として、²⁾ 微細粒子層の侵食量と斜面の抵抗力の時間変化を示したものである。図-3には、 τ_* が、微細粒子層の侵食限界以下であるため、 τ_{*r} の時間変化がない場合や、侵食の進行に伴って、侵食面が粗粒子によって遮蔽されるようになり、微細粒子層の侵食が停止して粗粒子の離脱がみられなくなるような状況が示されている。図-4は、受食性や粘着力が深さ方向に変化する、すなわち、表面から、ある深さまで弱い層が存在して、その下層が強い層になっている場合のものである。気温や水分変化、雨滴などによって表面が常に乱された状態にある場合は、図-2に示すような現象が、また、ガリ表面に水流以外の擾乱が加わらない場合は、図-4に示すようなパターンが現われることが予想される。以上、斜面上における粗粒子の移動に対する $k'_1 (p_r h_d/d)$ および f_{c*} の重要性を示した。

(2) 微細粒子の生産・流出機構

裸地斜面におけるガリ侵食による土砂の生産・流出は、図-4の $t < t_1$ および図-2に示すように微細粒子層の侵食が何層にもわたって継続するような状態において活発に行われ、図-4の $t > t_1$ および図-3の状況下では、非粘着性流路床の *armouring* に相当した現象がみられる。さて、粗粒子の移動の有無にかかわらず、 k'_1 の時間的変化および f_{c*} と密接な関係のある侵食速度 E を用いれば、土砂の生産・流出量が表示できる。

いま、問題を単純化するため、現象を鉛直平面内のものとし、粗粒子と微細粒子の重量混合比をそれぞれ p_s および $p_r (p_s + p_r = 1)$ 、混合物の空隙率を λ とする。さらに、上流から流送される土砂粒子による遮蔽効果は無視できるものとする。ガリ長、数百メートルにも及ぶような場合には、もはや遮蔽効果は無視できないが、⁵⁾ 崩壊裸地斜面のように、こう配 θ の大きい場を対象とするため、ガリの輸送能力に見合うような土砂が輸送される場合は、土石流型の輸送形態になることが推察される。したがって、このような場合には、別の *type* の侵食問題として扱う必要があるので、ここでは対象としない。さて、こういった条件下で、図-5に示すように、表面から $\alpha_1 d$ (d ：粗粒子径) の侵食速度の大きい弱い層があって、その下方には、侵食が停止して粗粒子が移動するに至らないような侵食速度 E_2 の強い層からなる場を考える。ただ

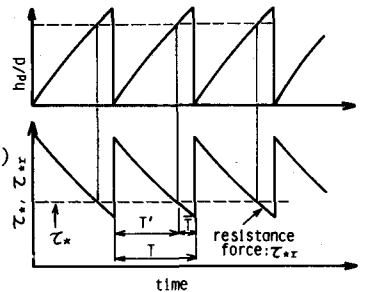


図-2 h_d/d および抵抗力の時間変化 ($f_{c*} = \text{const}$)

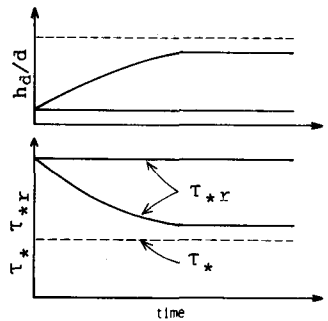


図-3 h_d/d および抵抗力の時間変化 ($f_{c*} = \text{const}$)

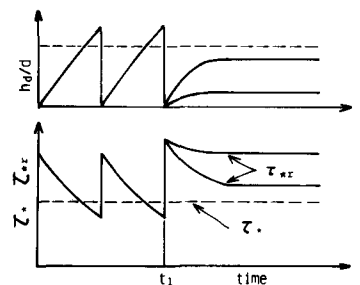


図-4 h_d/d および抵抗力の時間変化 ($f_{c*} \neq \text{const}$)

し、 E_1 および E_2 は混合物の侵食速度である。弱い層の侵食が終了する時間を t_1 とすると、この層の侵食によって生産・流出する微細成分および粗粒成分は、単位時間・面積当り、それぞれつぎのように示される。

$$m_f = \rho_s E_1 (1 - \lambda_0) p_f, (t \leq t_1) \dots\dots\dots(4)$$

$$m_o = \rho_s E_1 (1 - \lambda_0) p_o, (t \leq t_1) \dots\dots\dots(5)$$

一方、 $t > t_1$ においては、つぎのようである。粗粒子、微細粒子および空隙の占める体積比率をそれぞれ p_o' 、 p_f' および p_v' ($p_o' + p_f' + p_v' = 1$) とし、 $\alpha_2 d$ の層に残留している微細成分と、すでに流出した量をそれぞれ M_b および M_{out} とすると、次式が成り立つ。

$$M_{out} + M_b = \rho_s \alpha_2 d p_{f1} \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $p_{f1} : t = t_1$ における微細成分の体積比である。ここで、単位時間当りの流出量 m_{out} が M_b に比例するものとし、比例係数を κ とおくと、次式が成り立つ。

$$m_{out} = d M_{out} / dt = -d M_b / dt = \kappa M_b \dots\dots\dots(7)$$

いま、 κ および E_2 が時間的に変化しないと仮定すれば、 $\kappa = E_2 / \alpha_2 d$ と置けるので、この条件のもとに、これらの式を解くと、 p_f' および m_{out} がそれぞれつぎのように求められる。

$$p_f' = p_{f1}' \exp[-E_2 / \alpha_2 d \cdot (t - t_1)] \dots\dots\dots(8)$$

$$m_{out} = \rho_s p_{f1}' E_2 \exp[-E_2 / \alpha_2 d \cdot (t - t_1)] \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 $t = t_1$ における空隙率を λ_1 、微細成分の比率を p_{f1} とすると、 $p_{f1}' = (1 - \lambda_1) p_{f1}$ なる関係がある。

以上のように、単位面積、単位時間当りの微細粒子の流出量が定式化されたので、つぎに、図-6に示すようなガリ侵食による流出について述べよう。図-6には、ガリこう配 θ 、長さ L 、水面幅 B および流水断面積 A をもつガリの侵食状況が模式的に示されている。いま、ガリ侵食による微細土砂の流出を濃度（重量）表示すると、流水濃度は次のように示される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} q_{sf} \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 q_{sf} : 単位長さ当りの微細粒子の流入量で、(4)式および(9)式の E_1 および E_2 を潤辺長 S_p 上の平均値であると見なすと、 q_{sf} はつぎのように示される。

$$q_{sf} = \begin{cases} \frac{\rho_s}{\rho} E_1 (1 - \lambda_0) p_f S_p, (t \leq t_1) \dots\dots\dots(11) \\ \frac{\rho_s}{\rho} E_2 (1 - \lambda_1) p_{f1}' S_p \cdot \exp[-E_2 / \alpha_2 d \cdot (t - t_1)], (t > t_1) \dots\dots\dots(12) \end{cases}$$

これらを(10)式に代入して、ガリ下流端の濃度を解くと、ガリ下流端における流水濃度が、それぞれ次式のように求められる。

$$C(t) = \rho_s / \rho \cdot (1 - \lambda_0) p_f S_p L E_1 / Q, (t \leq t_1 (= \alpha_1 d / E_1)) \dots\dots\dots(13)$$

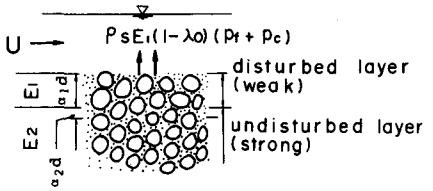


図-5 混合物の侵食による土砂の生産・流出

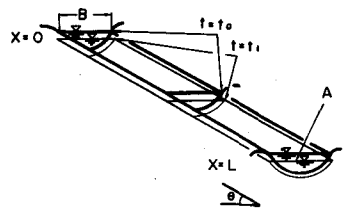


図-6 記号およびガリ侵食の模式図

$$C(t) = \rho_s / \rho (1 - \lambda_1) P_{f1} \frac{\alpha_2 d}{R} \left(\exp \left[\frac{E_2 L}{\alpha_2 d U} \right] - 1 \right) \exp \left[-\frac{E_2}{\alpha_2 d} (t - t_1) \right], \quad (t > t_1) \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $R = A / S_p$ （径深）である。これらの式から、ガリ侵食による微細粒子の生産・流出は、ガリの幾何形状、粒度分布および受食性（ E_1 ， E_2 ， α_1 ， α_2 ）によって規定されることが明らかである。しかし、一部を除いて、これらのパラメータを一般的に定めることは困難であるので、現地調査や実験によって適当な値を見出す必要がある。

8. 裸地斜面の受食性に関する現地実験

(1) 実験方法および条件

新宮川流域川原樋川支川の赤谷川沿いに分布する裸地（写真－１）を４箇所選び、斜面上にガリを作り、ガリ上流端から川の水をポンプ給水することによって、ガリの受食性に関する実験を行なった。測定項目は、ガリ上・下流端流量、水温、ガリ縦横断、水面幅、水位、流速、通水前後のガリの粒度分布、流砂の粒度分布、流砂量およびガリ下流端における流水濃度などである。

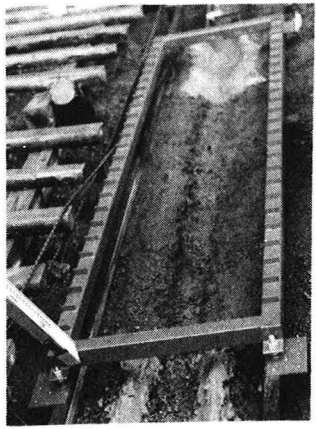
流量は、計量法および三角ぜきを用いて測定され、バルブ調整により所定の値が得られるようにされている。ガリ縦横断形、水面幅および水位は、写真－２に示す測定台を利用して、ポイントゲージを用いて測定された。流速は、中立粒子を投入し、その流下時間から求められた。粒度分布は水洗い法によって求め、濁度は積分球式濁度計を用いて測定された。濁度は、同じ微細砂を用いた検定曲線によって、SS濃度に変換されている。なお、実験斜面においては、空隙率が測定されるとともに、 105μ 以下の微細成分について、せん断試験等が行われている。

実験は、一つの斜面に対して、主に流量を3～5段階変化させて行われている。実験条件は、表－１のとおりである。ここで、Run Ⅱにおいて、最初の数字が同じものは、同一斜面における実験を意味している。

Q_u ， Q_d ：ガリ上・下流端の



写真－１ 崩壊裸地斜面
（斜面Ⅱ４）



写真－２ 測定台（10cm間隔のストッパー付）

表－１ 実験条件

Run No	Q_u (l/s)	Q_d (l/s)	T (°C)	B_0 (cm)	L (cm)	θ (deg.)	P_f	d_{90} (cm)	d_m (cm)	d_{84} (cm)	d_{65} (cm)	t_i (min.)	Σt_i (min.)
1-1	0.4	0.134	15.5	10.0	716	41	0.08	5.7	1.95	4.8	2.0	10.0	31.4
	0.368	0.143	16.5	"	"	"	"	4.6	2.24	4.1	2.7	11.1	
	0.383	0.152	15.5	"	"	"	"	"	"	"	"	10.3	
1-2	0.311	0.156	16.6	10.0	"	41	"	"	"	"	"	10.2	30.6
	0.302	0.127	16.3	"	"	"	"	3.5	2.09	3.2	2.6	10.2	
	0.305	0.113	16.4	"	"	"	"	"	"	"	"	10.2	
1-3	0.616	0.132	14.5	10.0	"	41	"	"	"	"	"	10.1	30.2
	0.606	0.175	13.6	"	"	"	"	4.6	2.47	4.2	3.2	10.1	
	0.632	0.157	14.2	"	716	"	"	2.4	1.24	2.1	1.20	10.6	
1-4	0.237	0.071	18.5	10.0	190	42.2	0.12	4.7	2.52	4.2	2.8	10.2	20.8
	0.250	0.076	18.5	"	190	"	0.06	1.75	0.95	1.4	0.76	5.1	
	0.845	0.539	18.8	10.0	150	41.2	0.13	3.2	2.28	3.0	2.4	5.0	
1-5	0.826	0.555	18.8	"	150	"	0.03	"	"	"	"	10.1	10.1
2-1	0.202	0.124	13.3	10.0	482	37	0.08	4.5	1.94	4.1	2.45	10.1	40.6
	0.204	0.107	10.2	"	"	"	"	"	"	"	"	10.3	
	0.196	0.109	14.2	"	"	"	"	"	"	"	"	10.1	
	0.213	0.127	12.6	"	"	"	"	"	"	"	"	10.1	
2-2	0.285	0.138	11.7	10.0	"	37	"	"	"	"	"	10.3	30.6
	0.298	0.160	11.4	"	"	"	"	"	"	"	"	10.1	
	0.302	0.170	11.2	"	"	"	"	"	"	"	"	10.2	
	0.396	0.187	9.4	10.0	"	37	"	"	"	"	"	10.1	
2-3	0.400	0.187	9.9	"	"	"	"	"	"	"	"	10.9	31.8
	0.381	0.180	9.9	"	482	"	"	3.3	1.92	3.1	2.4	10.8	
	0.396	0.180	9.9	"	"	"	"	"	"	"	"	10.9	
3-1	0.197	0.012	11.0	10.0	623	42	0.06	3.0	1.32	2.5	1.5	12.6	33.2
	0.201	0.027	11.8	"	"	"	"	"	"	"	"	10.3	
	0.195	0.023	12.2	"	"	"	"	"	"	"	"	10.3	
	0.292	0.026	11.2	10.0	"	42	"	"	"	"	"	10.5	
3-2	0.292	0.019	11.8	"	"	"	"	"	"	"	"	12.0	32.9
	0.296	0.022	11.9	"	"	"	"	"	"	"	"	10.4	
	0.394	0.048	11.1	10.0	"	42	"	"	"	"	"	10.3	
	0.385	0.029	11.5	"	"	"	"	"	"	"	"	10.5	
3-3	0.396	0.047	11.5	"	623	"	"	3.2	1.58	2.9	2.1	10.4	31.2
4-1	0.051	0.003	17.5	10.0	180	41.2	0.15	1.75	0.86	1.4	0.69	10.3	20.8
	0.053	0	18.0	"	"	"	0.10	3.5	1.42	3.0	1.03	10.5	
	0.151	0.027	17.8	10.0	"	41.2	0.19	1.35	0.77	1.1	0.61	12.4	
	0.146	0.008	18.1	"	180	"	0.07	3.8	1.25	2.25	1.6	10.7	
4-3	0.503	0.173	17.0	10.0	160	41.2	0.18	1.8	0.99	1.35	0.66	10.3	23.1
	0.485	0.167	17.0	"	160	"	0.04	3.2	2.15	2.9	2.25	10.3	

流量、 T : 水温、 B_0 : 初期ガリ幅、 L : ガリ長、 θ : ガリこう配、 p_f : 粒径 105μ 以下の成分の含有率、 t_1 : 通水時間、 Σt_1 : 実験終了までの全通水時間で、他は慣用記号である。

(2) 実験結果および考察

a) 流量変化 : 表-1に示すよう

に、いずれの実験においても浸透による流下方向の流量変化が無視できないので、以下の水理量の計算においては、つぎのような方法で、任意断面の流量を推定している。透水係数を一定として、松尾⁶⁾らの方法によって浸透流量を求め、流量の縦断変化を算定したところ、どの斜面においてもほぼ直線変化をしたので、流量は直線変化するものとみなしている。

b) 縦横断形状と粗粒化現象 : 図-7には、Run 1-4におけるガリ最深部の縦断形の時間変化が示されている。 $t = 0 \sim 1.06$ 分において、平均粒径の1~2倍程度の侵食が起るとともに、この時点で凹凸がかなり発達している。

1.06分以後、顕著な侵食はなく、凹凸の性状が若干変化する程度である。同様のことが、図-8に示す横断面の侵食および形状特性についても言える。写真-3は、 $x = 0.6$ m 近傍において、通水後1.06分に撮影されたものである。ガリの初期状態に対応するガリ外部の状況と比較して、ガリ内の粗粒化が顕著である。実験終了時のものは示していないが、目視では写真-3との区別はできない。図-9には、初期および実験終了時(2.08分)のガリ表面、生産・流出土砂および流水中に含まれる微細粒子の粒度分布が示されている。流出土砂の粒径は、初期のものより若干小さく、微細粒子とともに大きい砂礫の空隙を埋めていた比較的小さい砂粒が、粗粒化過程において

流出していることがわかる。流水中の微細粒子の粒度分布は時間的にも変動しながら若干小さくなるが、微細成分の50%以上が 10μ 以下の粒子からなっていることは、特記すべきことであろう。以上縦横断形と粗粒化現象について述べたが、図-4で示したように侵食特性が時間的に変化するの、ガリ表面が人為的な擾乱を受けているためであって、凹凸が形成されているのは、抵抗力すなわち(2)式または(3)式右辺第2項が場所的に変化することに主因があるように思われる。

c) 水面幅 : 芦田⁷⁾らは、流量が $10^{-6} \sim 10^{-4} m^3/s$ の広範な実験および観測結果を整理して、粘着性・非粘着性河床材料に関係なく(15)式のようなレジーム則が成り立つことを報告している。本実験で得られた結果も

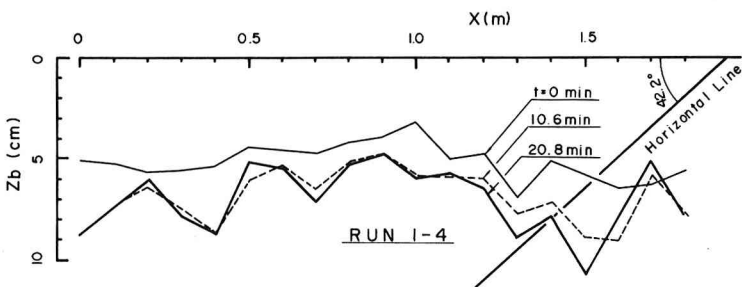


図-7 縦断形状 (Run 1-4)

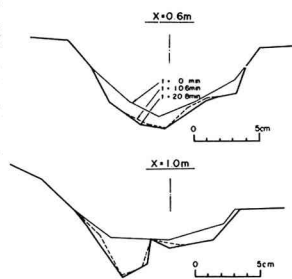


図-8 横断形状 (Run 1-4)



写真-3 Run 1-4 (10.6分後)

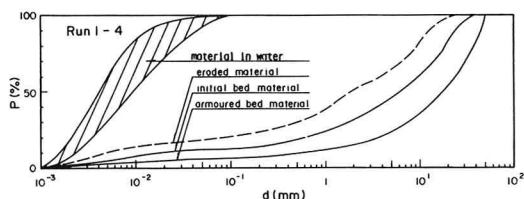


図-9 ガリおよび侵食土砂の粒度分布

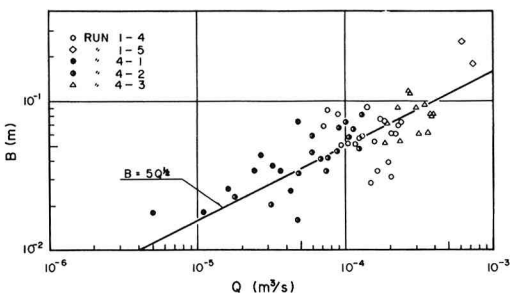


図-10 水面幅

図-11のようであって、

$$B = 5 Q^{1/2} \dots\dots\dots (15)$$

同様な関係が認められる。

d) 抵抗係数：この実験では、抵抗係数に対する不等流および浸透流の影響が大きいためにみえるが、これらの影響は、10%以下であって、ほぼ無視できる。図-11には、 $R/d_m, R/d_{84}$ および R/d_{50} をパラメータにして Darcy-Weisbach の抵抗係数 f が示されるとともに、Hey⁸⁾ による礫床河川のデータが示されている。本実験は、 $1000 < R_e (=UR/\nu) < 5000$ の範囲にあり、 R/d が小さいため粗度の影響を強く受け、多くの研究者が指摘しているように、流速分布が一様化することが予想される。

図中、右方の2本の曲線は、Prandtl-Kármán 型の抵抗則と Hey の提案式であって、左方の2本の曲線は、芦田³⁾ らが実験的に見出した流速分布則を適用したものである。これらの曲線と著者らおよび Hey のデータの傾向から考えて薄層乱流においては、 R/d が大きくなるに伴って、粗度要素型から Prandtl-Kármán 型の抵抗へ遷移することが推察される。

e) 侵食速度：ベントナイトの侵食実験から、芦田²⁾ らは、掃流力が侵食限界掃流力の数倍以上になると、無次元侵食速度 E/u_* は粘土の性質に応じて一定値に近づくことを見出した。図-12には、実験初期の凹凸が比較的小さい領域における縦横断変化から求めた E_1/u_* とせん断力との関係が示されている。かなりばらついているが、粒度分布や微細成分、とりわけ粘土の性質が同じであると思われる同一斜面のデータについてみると、 $E_1/u_* = \text{const}$ なる関係が認められる。

4. ガリ侵食による微細粒子の生産・流出モデルの検討

$t < t_1$ ($=\alpha_1 d/E_1$) すなわち人工的に乱された弱い層からの流出濃度について、 $\rho_s=2.65, \lambda_0=0.4, S_p=B=5Q^{1/2}, E_1/u_*=k_1$ (実験値)、 $\alpha_1=1.0$ および図-11の曲線Cすなわち $\sqrt{8/f}=5.0+0.87\{\ln R/0.8d-1\}$ なる条件を(13)式に適用し、Run 1-1と比較したものが図-13に示されている。 E_1 として、侵食速度の大きい断面から得られた値が採用されているため、計算値は若干大きく推定されているが、実験精度の面から考えて、(13)式はほぼ妥当なものと思われる。一方、粗粒化過程、 $t > t_1$ においては、流出濃度が指数減速することから、(14)式はほぼ妥当なものであることが考えられる。そこで、実験的に見出しにくい α_2 および E_2 について、(14)式を用いてこれらの値を逆算すると、 $\alpha_2 \approx 0.5$ および $E_2/u_* = 1.47 \times 10^{-4}$ 程度の値を得る。これは、微細粒子層が粗粒子の頂部より $0.5d_m$ だけ侵食された後、粗粒化が停止することに対応するとともに、 $E_2/u_* (=1.47 \times 10^{-4}) < E_1/u_* (=3.21 \times 10^{-4})$ であって、粘着力によるせん断抵抗力の大きな層の侵食速度は、表面近傍の乱された層のそれより、かなり小さいことを意味する。なお、図中の $t > t_1$ における計算値は、これらの値と、 $p_{r1} = p_r$ および

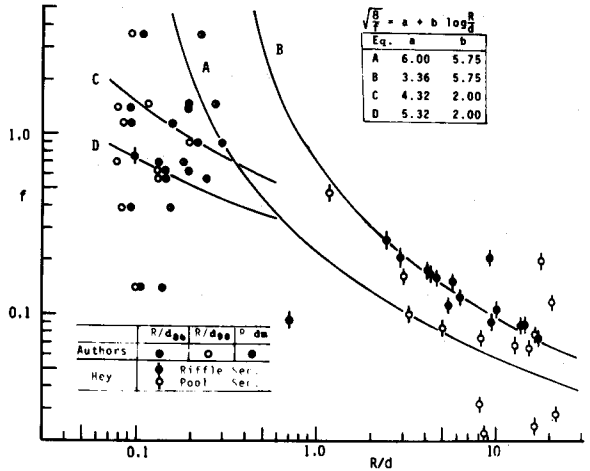


図-11 抵抗係数

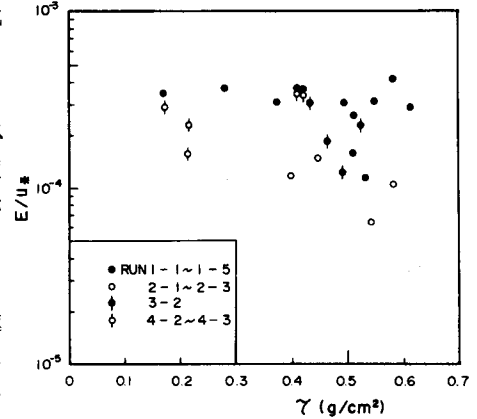


図-12 侵食速度とせん断応力の関係

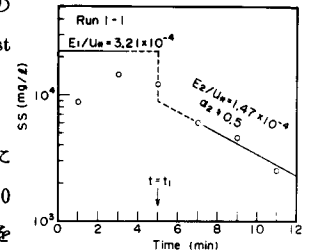


図-13 流出濃度に関する

計算値と実験値の比較

$\lambda_1 = \lambda_0$ として(4)式から求められたものである。

5. 結語

本研究においては、まず、こう配の大きい裸地斜面における土砂の生産・流出に関して、斜面材料が微細粒子を含有するために付加される粘着力による抵抗増加の重要性について述べ、こういった斜面における粗粒子の移動限界について定性的な考察を行なった。ついで、斜面からの土砂流出に対して支配的であると思われるガリ侵食を対象として、ガリ侵食による微細粒子の流出機構には二つの形態、すなわち、掃流力が粗粒子の移動限界より大きい場合 ($\tau_* > \tau_{*r}$) と移動限界より小さい場合 ($\tau_* < \tau_{*r}$) の生産・流出形態があることを推察するとともに、それぞれの形態における微細粒子の流出モデルを提案した。

さらに、生産・流出モデルに含まれる未知変数を定めるため、また、山地流域における wash load の問題に対して本モデルを適用していく観点から現地実験を行なったが、二三の興味深い結果を得た。まず、理論的に推察したように、微細粒子の生産・流出には、 $\tau_* > \tau_{*r}$ および $\tau_* < \tau_{*r}$ の場合の二つの形態があることが明らかにされた。ついで、摩擦速度など種々の水理量を算定する際、基本的な条件となる水面幅について、レジーム則が適用できることを確かめた。本実験は、 R/d が非常に小さく、しかも完全粗面乱流とみなせる領域のものであって、実験精度上の問題からデータはかなり散乱しているが、流水抵抗は、粗度要素型の抵抗を示すことを推察した。また、微細粒子の生産・流出に対して最も重要である侵食速度については、粗粒成分と微細成分の混合物の侵食速度を摩擦速度で無次元化し、芦田・田中²⁾が提案した $E/u_* = \text{const}$ なる関係を確かめた。

微細粒子の生産・流出モデルは、このような実験によって、その妥当性が示された。さて、本モデルの山地流域における wash load の問題への適用は、流域の裸地分布の調査を行ない、裸地の形状および大きさ、代表的な裸地におけるガリの本数や長さなどについてモデル化を行ない、若干の侵食試験を実施することによって、比較的容易に行なえる。しかし、今後解明すべき問題点も多く、とくに、粗粒子の移動限界 (τ_{*cc}) の問題、擾乱の程度と α_1 の関係、 E_2 および α_2 などについて、さらに考察を進める必要がある。

現地実験に際して、建設省近畿地方建設局ならびに紀南工事事務所の諸氏に協力していただいた。また、資料解析においては、新日本技術コンサルタントの古川整治氏に協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Partheniades, E.: Erosion and Deposition of Cohesive Materials, River Mechanics, Vol. II, edited by H.W. Shen, 1971.
- 2) 芦田和男・田中健二: 粘土分を含有する砂れき床の侵食と流砂機構に関する研究、京大防災研究所年報、17号B, 1974.
- 3) 芦田和男・大同淳之・高橋保・水山高久: 急勾配流れの抵抗と限界掃流力に関する研究、京大防災研究所年報、16号B, 1973.
- 4) 澤井健二・芦田和男: 内筒回転式土壌侵食試験法について、京大防災研究所年報、22号B-2, 1979.
- 5) 金屋敦忠儀・芦田和男・江頭進治: 山地流域における濁度物質の生産・流出モデルに関する研究、24回水理講演会論文集、1980.
- 6) 松尾新一郎・赤井浩一・池田一郎: 現地における地盤透水係数の一測定法: 土木学会誌 37-2, 1952.
- 7) 芦田和男・高橋保・水山高久: 流路工計画における水理学的研究、新砂防、Vol. 28, №2, 1975.
- 8) Hey, R.D.: Flow Resistance in Gravel-Bed Rivers, Proc. ASCE, Vol. 105, HY 4, 1979.